

cuflood 用户手册

梁秋华、夏熙临

2015 年 6 月 3 日

1 程序简介

cuflood 全称为 CUDA Accelerated Flooding Modelling System, 可用于模拟洪水演进过程, 其原理为使用有限体积法求解浅水方程。该软件使用了由梁秋华教授所开发的预平衡 Godunov 有限体积格式, 并且使用了 nvidia CUDA 平台进行显卡加速。由于采用了以上这些新技术, 该软件具有精度高, 计算速度快, 稳定性高等特点。本软件所采用的算法列于附录 A 中。

2 系统需求及安装

2.1 系统需求

- 硬件需求

运行本软件的计算机须安装支持 cuda 的 nvidia 图形加速卡或计算加速卡, 计算兼容性为 2.0 以上。可访问 nvidia 官方网站获取 cuda 硬件兼容性列表:

<https://developer.nvidia.com/cuda-gpus>

- 软件需求

本软件可编译运行于 Windows, Linux 及 Mac OS 平台之上, 用于编译运行此软件的计算机须安装 5.0 版之上的 CUDA Toolkit 及 Visual C++ 或 GCC 等 C++ 编译器。

2.2 安装

- Windows 平台

在 Windows 平台下可使用 Microsoft Visual Studio 2010 及以上版本的集成编译环境。在正确安装 CUDA Toolkit 之后, 以 CUDA Toolkit 6.5 为例, 打开 Visual Studio, 在菜单中选择“文件 -> 新建 -> 工程”, 选择“NVIDIA->CUDA 6.5”。新建完项目后, 在解决方案目录中删除默认的 kernel.cu, 添加软件包 src 目录下的 cuflood.cu 作为源文件。在工具栏中将生成模式由 Debug 换为 Release, 然后选择菜单中的“生成 -> 生成解决方案”。最终生成的可执行文件在工程所在文件夹的 Release 目录下。

- Mac OS 及 Linux 平台

在 Mac OS 及 Linux 平台下可直接利用软件包所提供的 Makefile, 进入软件包中的 src 目录中执行 make 命令即可。

3 详细使用说明

3.1 运行

将所有输入文件与编译生成的可执行文件置于同一文件夹内，并在该文件夹内新建一个名为 <output> 的文件夹用于存放计算结果，完成上述准备工作后，在该目录中执行编译生成的可执行文件即可，程序开始运行后会列出本机所有可用 CUDA 设备，键入相应的编号并按回车即可选择该 CUDA 设备进行计算。所需的所有输入文件均列于表 1 中。

表 1: 输入文件列表

| 文件名 | 说明 |
|-----------------|-----------------|
| DEM.txt | 地形数据 |
| h.txt | 初始水深 |
| u.txt | 初始 x 方向速度 |
| v.txt | 初始 y 方向速度 |
| Manning.txt | 每个网格的曼宁系数 |
| mask.txt | 网格类型标签 |
| psc.txt | 关于点源项的标签 |
| inflow N.dat | 第 N 个入流边界处的数据 |
| psc N.dat | 第 N 簇网格集合的点源项数据 |
| thist_gauge.dat | 定义监测点 |
| setup.ste | 程序设定 |

各输入文件的具体介绍如下：

- DEM.txt

DEM.txt 为底床地形的数字高程模型数据，该文件可由 ArcGIS 软件直接生成。在数字高程模型中，地形是由规则分布的一系列控制点的高程所描述的。cuflood 中的计算网格也是均匀分布的，如图 1 所示，计算区域为一矩阵，在该矩阵中有 $M \times N$ 个网格，每个网格均对应数字高程模型中的一个控制点。因此，可用数字高程模型数据对 cuflood 中的地形加以初始化，其具体格式列于表 2 中¹。

- h.txt

h.txt 存储了初始的水深，其格式与 DEM.txt 类似，唯一的区别是 h.txt 中存储的不是高程而是每个网格处的初始水深，水深的单位为 m。

¹本文档中所列的输入文件格式中的楷体及斜体字均为注释

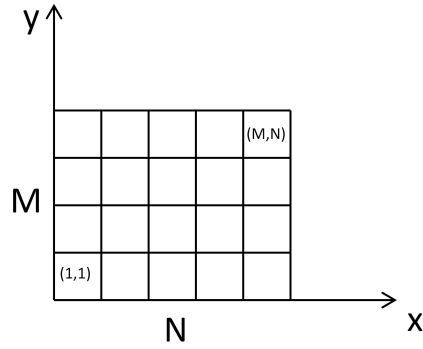


图 1: cuflood 计算网格示意图

表 2: DEM.txt 格式

| | | |
|--------------|-------|------------------|
| ncols | VALUE | 列数 |
| nrows | VALUE | 行数 |
| xlcorner | VALUE | 原点横坐标，单位为米 |
| ylcorner | VALUE | 原点纵坐标，单位为米 |
| cellsize | VALUE | 网格大小，单位为米 |
| NODATA_value | VALUE | 无数据值，标记该网格无真实数据 |
| VALUE | ... | VALUE 第 M 行网格的高程 |
| | ... | |
| VALUE | ... | VALUE 第 1 行网格的高程 |
| 第 1 列网格的高程 | ... | 第 N 列网格的高程 |

- u.txt
u.txt 存储了初始的 x 方向速度，其格式与 DEM.txt 类似，唯一的区别是 u.txt 中存储的不是高程而是每个网格处的初始 x 方向速度，速度的单位为 m/s。
- v.txt
v.txt 存储了初始的 y 方向速度，其格式与 DEM.txt 类似，唯一的区别是 v.txt 中存储的不是高程而是每个网格处的初始 y 方向速度，速度的单位为 m/s。
- Manning.txt
Manning.txt 格式与 DEM.txt 类似，唯一的区别是 Manning.txt 中存储的不是高程而是每个网格处的曼宁系数，为无量纲量。

- mask.txt

mask.txt 格式与 DEM.txt 类似，该文件中存储的是网格类型，网格类型用整数表式，可分为三类，如表 3 中所示：

| 表 3: 网格类型 | | | |
|-----------|--------|---|---------------|
| 0 | 1 | <1 | 2 |
| 非边界网格 | 固壁边界网格 | 开放边界网格，其绝对值表示边界的编号，如 - 1 表示第 1 号开放边界，入流流量等数据存放于 inflow 1.dat 中 | 无效网格，该网格不参与计算 |

- psc.txt

psc.txt 格式与 DEM.txt 类似，该文件中存储的是网格所在簇的编号，该编号用于施加点源项。若编号为 0 则表示该网格中不存在点源项，若编号大于 0，则施加对应的点源项，例如编号为 1 的网格上施加存放于 psc 1.dat 中的点源项数据。通常点源项可用于描述降雨。

- inflow N.dat

在入流或出流边界条件中，有些时候需要预先给定水深或流量的值，inflow N.dat 中定义了第 N 个入流处的水深、流量等随时间变化数据。为了正确打开文件，在文件名中的 inflow 与 N 之间应包含三个空格。该文件中的第一行用一个整数表示处入流的方向，1 为北面，2 为东面，3 为南面，4 为西面。第二行用五个整数分别表示是否固定水深 h ，x 方向速度 u ，y 方向速度 v ，x 方向流量 q_x ，y 方向流量 q_y ；0 表示不固定，1 表示固定。接下来一行用一个整数定义控制时间点的数据。文件余下部分为每个时间点的数据，其中第一列为时间，单位为秒。第 2 列为水深的数值，若水深不预先固定，所有值均设为 0。第三列为 x 方向速度或流量的数据，若固定速度，则该列定义为速度，若固定流量，则该列定义为流量，若均不固定，则值设为 0。第四列为 y 方向速度或流量的数据，若固定速度，则该列定义为速度，若固定流量，则该列定义为流量，若均不固定，则值设为 0。在 cuflood 中，任意时间点上的值由两个控制时间点通过线性插值得到。该文件中所定义的流量为整段边界上的总流量。若是将所有变量均设为不预先固定，则该出入流边界实际上是一个无反射边界。该文件的示例如表 4 中所示。

表 4: inflow N.dat 格式

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|
| VALUE | | | | | 方向 |
| VALUE | VALUE | VALUE | VALUE | VALUE | 定义是否固定某一变量, 0 为固定, 1 为不固定 |
| VALUE | | | | | 时间, 点个数 |
| VALUE | VALUE | VALUE | VALUE | | 第 1 个时间点数据 |
| | ... | | | | |
| VALUE | VALUE | VALUE | VALUE | | 第 N 个时间点数据 |

- psc N.dat

有时为了施加降雨条件, 需在网格上预先给定随时间变化的点源项的值。psc N.dat 中存储了第 N 簇网格上的点源项的值。文件名中的 psc 与 N 之间应该有三个空格。与 inflow N.dat 类似, 数据由多个控制时间点来定义, 其中第一列为时间, 单位为 t, 第二列为单位面积上的水深变化率 (ms^{-1})。该文件的示例如表 5 中所示。

表 5: psc N.dat 格式

| | | | |
|-------|-------|--|------------|
| VALUE | | | 时间, 点个数 |
| VALUE | VALUE | | 第 1 个时间点数据 |
| | ... | | |
| VALUE | VALUE | | 第 N 个时间点数据 |

- thist_gauge.dat

有时需要观察某位置处的水深, 速度的时程曲线。cuflood 提供了输出某一些网格处的水深, 速度随时间变化历史的功能。在 thist_gauge.dat 中定义了观测点的坐标, 文件格式如表 6 中所示。

表 6: thist_gauge.dat 格式

| | | |
|-------|-------|------------------------------|
| VALUE | | 观测点个数 |
| VALUE | VALUE | 第 1 个观测点坐标, 第一列为横坐标, 第二列为纵坐标 |
| | ... | |
| VALUE | VALUE | 第 N 个观测点坐标 |

- setup.ste

setup.ste 用于设定执行过程中的参数, 其具体格式为列于表 7 中。

表 7: setup.ste 格式

| | |
|------------------------|--|
| order | |
| VALUE | 此选项设置精度, 1 为一阶精度, 2 为二阶精度 |
| number of rows | |
| VALUE | 计算区域行数, 设为大于 0 的整数 |
| number of columns | |
| VALUE | 计算区域列数, 设为大于 0 的整数 |
| tall | |
| VALUE | 总物理时间, 单位为秒 |
| initial dt | |
| VALUE | 初始时间步长, 单位为秒 |
| CFL | |
| VALUE | 柯朗数, 控制时间步长大小, 大于 0 小于 1 |
| x length | |
| VALUE | 计算域 x 方向长度, 单位为米 |
| y length | |
| VALUE | 计算域 y 方向长度, 单位为米 |
| x cell size | |
| VALUE | x 方向网格大小 |
| y cell size | |
| VALUE | y 方向网格大小 |
| output interval | |
| VALUE | 输出时间间隔 |
| bound_E | |
| VALUE | 计算域东边界类型, 1 为开放边界, 2 为固壁边界 |
| bound_W | |
| VALUE | 计算域西边界类型, 1 为开放边界, 2 为固壁边界 |
| bound_N | |
| VALUE | 计算域北边界类型, 1 为开放边界, 2 为固壁边界 |
| bound_S | |
| VALUE | 计算域南边界类型, 1 为开放边界, 2 为固壁边界 |
| bound_body | |
| VALUE | 非计算网格边界类型, 1 为开放边界, 2 为固壁边界 |
| nobr | |
| VALUE | 入流边界数量, 设为大于或等于 0 的整数 |
| nops | |
| VALUE | 定义了点源项的网格簇数量, 设为大于或等于 0 的整数 |
| output_history | |
| VALUE | 是否输出监测点处的水深时间历程, 设为 <i>true</i> 或 <i>false</i> |
| allcells_are_monitored | |
| VALUE | 是否将每个网格均作为监测点, 设为 <i>true</i> 或 <i>false</i> |
| console_in_one_line | |
| VALUE | 是否将控制台中的信息仅输出一行, 设为 <i>true</i> 或 <i>false</i> |

所有的输入文件在 sample 文件夹中均有示例，可以此作为参照进行设置，在 windows 中建议使用 notepad++ 打开这些文件，系统默认的的记事本无法正确显示这些文件的格式。

3.2 输出文件格式

输出文件均生成在 <output> 文件夹中，输出文件可分为两类：第一类是某一时间点所有网格的各变量值，其文件名格式为 result Ns.txt，代表第 N 秒的结果。在该文件中，每一行代表一个网格，第一列为横坐标 x ，第二列为纵坐标 y ，第三列为底床高 z_b ，第四、五、六列分别为水深 h ， x 方向流速 u ， y 方向流速 v 。为了节约存储空间，只有水深大于 0 的网格才会被输出。第二类是所有观测点的水位 η 随时间的变化，文件名为 time_history.dat。在该文件中，第一列为时间，此后各列依次为从第一个观测点到最后一个观测点的水位值。

4 示例

cuflood 还在 <sample> 文件夹提供了一个示例以方便使用者测试本软件和学习配置输入文件。本软件所提供地示例为英国泰晤士河流域的一次假想溃坝洪水，如图 2 所示，洪水发生区域位于英国泰晤士河南岸，地形由 10m 精度的 DTM 数据表示，整个区域的曼宁系数均设为 0.035。在图 2 所标记位置有一 150m 宽的溃口，溃坝水流的流量按图 3 事先给定。在洪水发生区域中如图 2 所示共有 4 个水位监测点。10 个小时之后的洪水淹没图如图 4 所示。各个监测点处的水位随时间变化的历史如图 5 所示。使用者可对照这些结果检验模型是否运行正确。

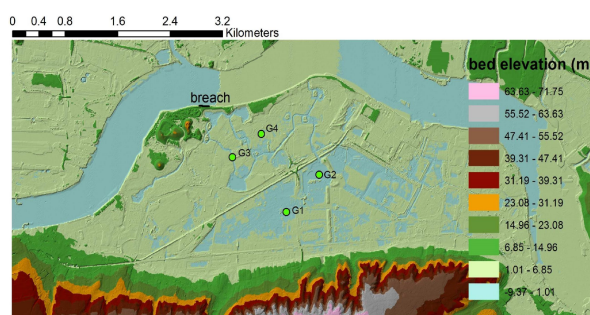


图 2: 溃坝洪水发生区域地形示意图

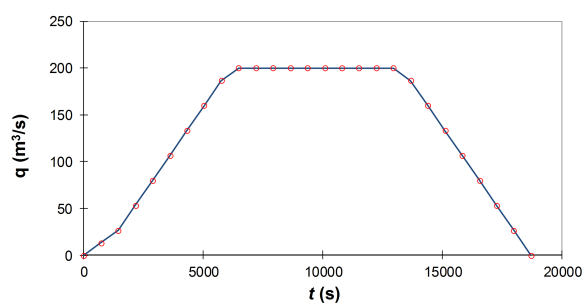


图 3: 溃坝水流流量

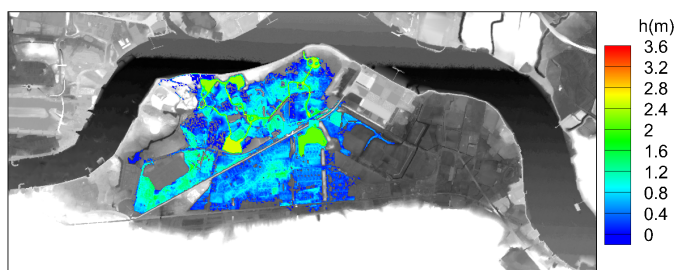


图 4: 10 小时后的洪水淹没图

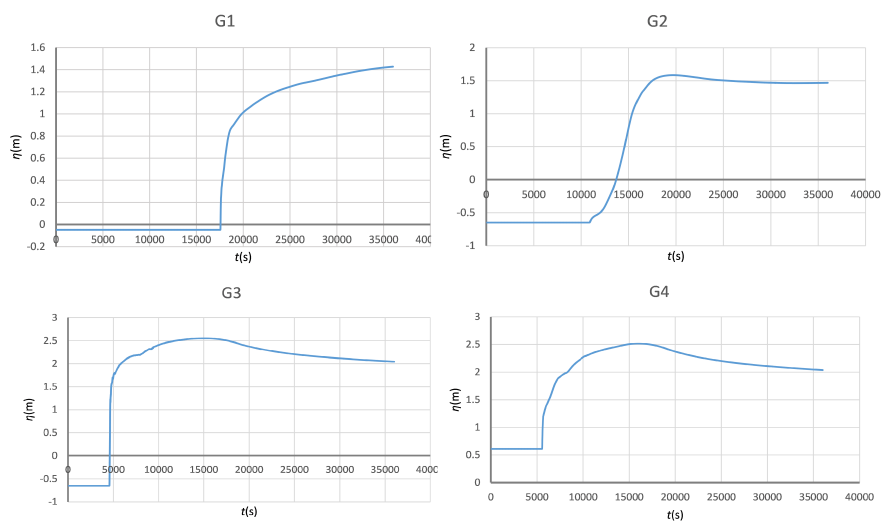


图 5: 监测点处水位随时间变化的历史

附录 A 算法简介

A.1 Godunov 型有限体积法

本软件所采用的算法为梁秋华教授所提出的预平衡 Godunov 型有限体积法 [1]。其控制方程为：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \eta \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}g(\eta^2 - 2\eta z_b) \\ uvh \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}g(\eta^2 - 2\eta z_b) \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\tau_{bx}}{\rho} - g\eta \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ -\frac{\tau_{by}}{\rho} - g\eta \frac{\partial z_b}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, η 为水面高, h 为水深, z_b 为底床高, u 和 v 分别为 x 、 y 方向的速度, g 为重力加速度, τ_{bx} 、 τ_{by} 为底部摩擦力, 按曼宁公式求得：

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 h^{-1/3} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad \text{and} \quad \tau_{by} = \rho g n^2 h^{-1/3} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

其中 n 为曼宁系数, 该方程能够严格保持源项和内力项的平衡从而保证了计算精度。一阶精度 Godunov 型有限体积法的时间积分格式为：

$$\mathbf{U}^{t+\Delta t} = \mathbf{U}^t - \frac{\Delta t}{\Delta x}(\mathbf{F}_E - \mathbf{F}_W) - \frac{\Delta t}{\Delta y}(\mathbf{G}_N - \mathbf{G}_S) + \Delta t \mathbf{S} \quad (4)$$

其中, \mathbf{F}_E 、 \mathbf{F}_W 、 \mathbf{G}_N 、 \mathbf{G}_S 分别为东、西、北、南四个面上的通量。该通量使用 HLLC 近似黎曼解加以计算。以东面为例：

$$\mathbf{F}_E = \begin{cases} \mathbf{F}_L & 0 \leq S_L \\ \mathbf{F}_{*L} & S_L \leq 0 \leq S_M \\ \mathbf{F}_{*R} & S_M \leq 0 \leq S_R \\ \mathbf{F}_R & S_R \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{F}_L = \mathbf{F}(\mathbf{U}_L)$ 、 $\mathbf{F}_R = \mathbf{F}(\mathbf{U}_R)$ 分别为左右两边的黎曼状态, S_L 、 S_R 和 S_M 为特征波速。 \mathbf{F}_{*L} 和 \mathbf{F}_{*R} 的计算公式为：

$$\mathbf{F}_{*L} = \begin{bmatrix} f_{*1} \\ f_{*2} \\ v_L f_{*1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_{*R} = \begin{bmatrix} f_{*1} \\ f_{*2} \\ v_R f_{*1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

\mathbf{F}_* 的计算公式为:

$$\mathbf{F}_* = \frac{S_R \mathbf{F}_L - S_L \mathbf{F}_R + S_L S_R (\mathbf{U}_R - \mathbf{U}_L)}{S_R - S_L} \quad (7)$$

左右特征波速的计算公式为:

$$S_L = \begin{cases} u_R - 2\sqrt{gh_R} & h_L = 0 \\ \min(u_L - \sqrt{gh_L}, u_* - \sqrt{gh_*}) & h_L > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$S_R = \begin{cases} u_L + 2\sqrt{gh_L} & h_R = 0 \\ \min(u_R + \sqrt{gh_R}, u_* + \sqrt{gh_*}) & h_R > 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$u_* = \frac{1}{2}(u_L + u_R) + \sqrt{gh_L} - \sqrt{gh_R} \quad (10)$$

$$h_* = \frac{1}{g} \left[\frac{1}{2}(\sqrt{gh_L} + \sqrt{gh_R}) + \frac{1}{4}(u_L - u_R) \right]^2 \quad (11)$$

中间特征波速计算公式为:

$$S_M = \frac{S_L h_R (u_R - S_R) - S_R h_L (u_L - S_L)}{h_R (u_R - S_R) - h_L (u_L - S_L)} \quad (12)$$

在二阶精度格式中, cuflood 采用了 MUSCL-Hancock 方法, 该方法分为预测步和校正步两步, 预测步为:

$$\bar{\mathbf{U}}^{t+\Delta t/2} = \mathbf{U}^t - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\mathbf{F}_E - \mathbf{F}_W) - \frac{\Delta t}{2\Delta y} (\mathbf{G}_N - \mathbf{G}_S) + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{S} \quad (13)$$

在预测步中, 面上的通量没有使用近似黎曼解计算, 而是直接用分段线性插值方法求得。在获得了预测后的变量后, 再利用式 (4) 即可获得下一时间步的结果, 其中所用到的面上的黎曼状态是根据预测步的结果分段线性插值求得的。为了减少数值震荡, 在线性插值的过程中还需要用到斜率限制器以减少数值震荡。线性插值公式为:

$$\hat{\mathbf{U}}_i = \mathbf{U}_i + \Psi(r) \mathbf{r} \nabla \mathbf{U}_i \quad (14)$$

其中, $\nabla \mathbf{U}$ 为梯度向量, \mathbf{r} 为距离向量, $\Psi(r)$ 为斜率限制函数, 该函数定义为:

$$r = \frac{\eta_+ - \eta_i}{\eta_i - \eta_-} \quad r = \frac{(uh)_+ - (uh)_i}{(uh)_i - (uh)_-} \quad r = \frac{(vh)_+ - (vh)_i}{(vh)_i - (vh)_-} \quad (15)$$

$$\Psi(r) = \max[0, \min(\beta r, 1), \min(r, \beta)] \quad (16)$$

+、- 分别表示再坐标轴正方向和负方向的相邻网格。在式 (16) 中, $1 \leq \beta \leq 2$, 若 $\beta = 1$, 则为 minmod 限制器, 若 $\beta = 2$, 则为 superbee 限制器, cuflood 中使用的是 minmod 限制器。

为了计算干湿边界变化的情况，在计算中还需要对底床及水位高加以临时修正，修正公式为：

$$z_{bf} = \max(z_{b,L}, z_{b,R}) \quad \Delta z = \max(0, z_{bf} - \eta_R) \quad (17)$$

$$\tilde{h}_L = \max(0, \eta_L - z_{bf}) \quad \tilde{h}_R = \max(0, \eta_R - z_{bf}) \quad (18)$$

$$\tilde{\eta}_L = \tilde{h}_L + z_{bf} - \Delta z \quad \tilde{\eta}_R = \tilde{h}_R + z_{bf} - \Delta z \quad (19)$$

其中 z_{bf} 为两网格交界面处的底床高，将修正过的水深 \tilde{h}_L 、 \tilde{h}_R 水位当作黎曼状态用于近似黎曼求解器即可。以 x 方向为例，地形源项的计算公式为：

$$-g\eta \frac{\partial z_b}{\partial x} = -g\eta_i \frac{z_{b,E} - z_{b,W}}{\Delta x} \quad (20)$$

摩擦项的计算公式为：

$$q_x^{t+\Delta t} = q_x^t + \Delta t F_x \quad (21)$$

$$F_x = \frac{S_{fx}}{D_{dx}} \quad (22)$$

$$S_{fx} = -q_x C_f / h^2 \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \quad (23)$$

$$D_{dx} = 1 + \Delta t C_f / h^2 \frac{2q_x + q_y}{\sqrt{q_x^2 + q_y^2}} \quad (24)$$

$$C_f = gn^2 h^{-1/3} \quad (25)$$

其中 q_x 、 q_y 分别问 x 和 y 方向的流量。cuflood 使用自适应时间步长，时间步长的计算公式为：

$$\Delta t = C \min(\Delta t_x, \Delta t_y) \quad (26)$$

$$\Delta t_x = \min_i \frac{\Delta x_i}{|u_i| + \sqrt{gh_i}} \quad \Delta t_y = \min_i \frac{\Delta y_i}{|v_i| + \sqrt{gh_i}} \quad (27)$$

其中， C 取大于 0 小于或等于 1 的值，通常建议 C 值设为 0.8。

A.2 边界条件处理

1. 固壁边界条件

$$h_B = h_I \quad \hat{u}_B = -\hat{u}_I \quad \hat{v}_B = \hat{v}_I \quad (28)$$

其中， B 、 I 分别表示边界值和内部值， \hat{u} 和 \hat{v} 分别表示边界法向和切向方向的速度。

2. 入流及出流边界条件

- 次临界流 $F_r < 1$

此时水深和法向速度只固定其中一个，固定水深时：

$$\hat{u}_B = \hat{u}_I \quad \hat{v}_B = \hat{v}_I \quad (29)$$

固定速度时：

$$h_B = h_I \quad \hat{v}_B = \hat{v}_I \quad (30)$$

- 超临界流 $F_r > 1$

此时水深和法向速度均固定

$$h_B = h_I \quad \hat{u}_B = \hat{u}_I \quad \hat{v}_B = \hat{v}_I \quad (31)$$

参考文献

- [1] Qiuhua Liang and Alistair G L Borthwick. Adaptive quadtree simulation of shallow flows with wet-dry fronts over complex topography. *Computers & Fluids*, 38(2):221–234, 2009.